

无线传感器网络的拓扑控制*

张 学^{1,2,3+}, 陆桑璐^{1,2}, 陈贵海^{1,2}, 陈道蓄^{1,2}, 谢 立^{1,2}

¹(计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学),江苏 南京 210093)

²(南京大学 计算机科学与技术系,江苏 南京 210093)

³(南京农业大学 工学院 电气工程系,江苏 南京 210031)

Topology Control for Wireless Sensor Networks

ZHANG Xue^{1,2,3+}, LU Sang-Lu^{1,2}, CHEN Gui-Hai^{1,2}, CHEN Dao-Xu^{1,2}, XIE Li^{1,2}

¹(State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University), Nanjing 210093, China)

²(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

³(Department of Electrical Engineering, School of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-25-83597284, Fax: +86-25-83686757, E-mail: zhangxue@dislab.nju.edu.cn, <http://cs.nju.edu.cn>

Zhang X, Lu SL, Chen GH, Chen DX, Xie L. Topology control for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007,18(4):943-954. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/943.htm>

Abstract: Topology control is one of the most fundamental problems in wireless sensor networks. It is of great importance for prolonging network lifetime, reducing radio interference, increasing the efficiency of MAC (media access control) protocols and routing protocols, among other things. This paper makes a full-scale introduction to the advancement of research on topology control. Firstly, the topology control problem and the design objectives are clearly presented. Secondly, an introduction is made to representative research efforts, along with analyses and comparisons, in two aspects, power control and sleep scheduling, respectively. At the same time, the defects of those efforts are clearly pointed out. Finally, existing problems, open issues and research trends are analyzed and summarized.

Key words: sensor network; wireless network; topology control; power control; sleep scheduling

摘 要: 拓扑控制是无线传感器网络研究中的核心问题之一.拓扑控制对于延长网络的生存时间、减小通信干扰、提高 MAC(media access control)协议和路由协议的效率等具有重要意义.全面阐述了拓扑控制技术的研究进展,首先明确了拓扑控制研究的问题和设计目标,然后分别从功率控制和睡眠调度两个方面介绍代表性的研究工作,并加以分析和比较,同时指出了这些工作存在的不足.最后分析和总结了研究现状中存在的问题、需要进一步研究的内容以及拓扑控制研究的发展趋势.

关键词: 传感器网络;无线网络;拓扑控制;功率控制;睡眠调度

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60673154 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA01Z199 (国家高技术研究发展计划(863)); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2006CB303000 (国家重点基础研究发展计划(973)); the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China under Grant No.BK2005411 (江苏省自然科学基金)

Received 2006-09-13; Accepted 2006-11-16

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

无线传感器网络有着广阔的应用前景,它在国家安全、环境监测、交通管理、空间探索等领域具有重大的应用价值,因而引起了军界、工业界和学术界的高度关注.2003年,美国《技术评论》将无线传感器网络列为十大新兴技术之首.2005年,欧洲第1届专业传感器网络会议在德国柏林召开.同年,ACM增设传感器网络研究专刊 TOSN(transactions on sensor networks).无线传感器网络向科技工作者提出了大量的研究课题,拓扑控制是其中的一个基本问题.拓扑控制就是要形成一个优化的网络拓扑结构,它是传感器网络中许多其他研究课题的基础.

无线传感器网络一般具有大规模、自组织、随机部署、环境复杂、传感器节点资源有限、网络拓扑经常发生变化的特点^[1].这些特点使拓扑控制成为挑战性研究课题,同时,这些特点也决定了拓扑控制在无线传感器网络研究中的重要性:首先,拓扑控制是一种重要的节能技术;其次,拓扑控制保证覆盖质量和连通质量;再次,拓扑控制能够降低通信干扰、提高 MAC(media access control)协议和路由协议的效率、为数据融合提供拓扑基础;此外,拓扑控制能够提高网络的可靠性、可扩展性等其他性能.总之,拓扑控制对网络性能具有重大的影响,因而对它的研究具有十分重要的意义.

以加州大学伯克利分校、加州大学洛杉矶分校、伊利诺斯大学、麻省理工学院和康奈尔大学为代表的美国著名高校在无线传感器网络拓扑控制研究方面已经取得了初步的研究成果.其他国家在这一领域的研究均落后于美国.我国在这一领域的研究由于起步相对较晚,与当今发达国家特别是与美国相比存在一定的差距.

目前,拓扑控制研究已经形成功率控制和睡眠调度两个主流研究方向^[2].所谓功率控制,就是为传感器节点选择合适的发射功率;所谓睡眠调度,就是控制传感器节点在工作状态和睡眠状态之间的转换.

传感器网络拓扑可以根据节点的可移动与否(动态的或静态的)和部署的可控与否(可控的或不可控的)分为如下4类^[2]:

- (1) 静态节点、不可控部署:静态节点随机地部署到给定的区域.这是大部分拓扑控制研究所作的假设.对稀疏网络的功率控制和对密集网络的睡眠调度是两种主要的拓扑控制技术.
- (2) 动态节点、不可控部署:这样的系统称为移动自组织网络(mobile ad hoc network,简称 MANET).其挑战是无论独立自治的节点如何运动,都要保证网络的正常运转.功率控制是主要的拓扑控制技术.
- (3) 静态节点、可控部署:节点通过人或机器人部署到固定的位置.拓扑控制主要是通过控制节点的位置来实现的,功率控制和睡眠调度虽然可以使用,但已经是次要的了.
- (4) 动态节点、可控部署:在这类网络中,移动节点能够相互定位.拓扑控制机制融入到移动和定位策略中.因为移动是主要的能量消耗,所以节点间的能量高效通信不再是首要问题.因为移动节点的部署不太可能是密集的,所以睡眠调度也不重要.

本文第1节介绍拓扑控制的设计目标和相关概念.第2节分别从功率控制和睡眠调度这两个主流方向来阐述拓扑控制的研究进展.第3节详细介绍影响较大的 XTC,CCP,SPAN 和 HEED 这4个项目以及存在的不足.第4节全面分析、归纳当前研究现状中存在的问题.最后给出总结及发展趋势.

1 拓扑控制的设计目标

拓扑控制研究的问题是:在保证一定的网络连通质量和覆盖质量的前提下,一般以延长网络的生命期为主要目标,兼顾通信干扰、网络延迟、负载均衡、简单性、可靠性、可扩展性等其他性能,形成一个优化的网络拓扑结构.无线传感器网络是与应用相关的,不同的应用对底层网络的拓扑控制设计目标的要求也不尽相同.下面介绍拓扑控制中一般要考虑的设计目标和相关的概念、结论.

(1) 覆盖:覆盖可以看成是对传感器网络服务质量的度量.在覆盖问题中,最重要的因素是网络对物理世界的感知能力^[3].覆盖问题可以分为区域覆盖、点覆盖和栅栏覆盖(barrier coverage)^[4].区域覆盖研究对目标区域的覆盖(监测)问题;点覆盖研究对一些离散的目标点的覆盖问题;栅栏覆盖研究运动物体穿越网络部署区域被发

现的概率问题.相对而言,对区域覆盖的研究较多.如果目标区域中的任何一点都被 k 个传感器节点监测,就称网络是 k -覆盖的,或者称网络的覆盖度为 k .一般要求目标区域的每一个点至少被一个节点监测,即 1-覆盖.因为讨论完全覆盖一个目标区域往往是困难的,所以有时也研究部分覆盖,包括部分的 1-覆盖和部分的 k -覆盖.而且有时也讨论渐近覆盖,所谓渐近覆盖是指,当网络中的节点数趋于无穷大时,完全覆盖目标区域的概率趋于 1.对于已部署的静态网络,覆盖控制主要是通过睡眠调度实现的.Voronoi 图是常用的覆盖分析工具.对于动态网络,可以利用节点的移动能力,在初始随机部署后,根据网络覆盖的要求实现节点的重部署.虚拟势场方法是一种重要的重部署方法.覆盖控制是拓扑控制的基本问题.

(2) 连通:传感器网络一般是大规模的,所以传感器节点感知到的数据一般要以多跳的方式传送到汇聚节点.这就要求拓扑控制必须保证网络的连通性.如果至少要去掉 k 个传感器节点才能使网络不连通,就称网络是 k -连通的,或者称网络的连通度为 k .拓扑控制一般要保证网络是连通(1-连通)的.有些应用可能要求网络配置到指定的连通度.像渐近覆盖一样,有时也讨论渐近意义下的连通,亦即当部署区域趋于无穷大时,网络连通的可能性趋于 1.功率控制和睡眠调度都必须保证网络的连通性,这是拓扑控制的基本要求.

(3) 网络生命期:网络生命期有多种定义.一般将网络生命期定义为直到死亡节点的百分比低于某个阈值时的持续时间^[5].也可以通过对网络的服务质量的度量来定义网络的生命期^[6],我们可以认为网络只有在满足一定的覆盖质量、连通质量、某个或某些其他服务质量时才是存活的.功率控制和睡眠调度是延长网络生命期的十分有效的技术.最大限度地延长网络的生命期是一个十分复杂的问题,它一直是拓扑控制研究的主要目标.

(4) 吞吐能力:设目标区域是一个凸区域,每个节点的吞吐率为 λ bits/s,在理想情况下,则有下面的关系式^[7]:

$$\lambda \leq \frac{16AW}{\pi\Delta^2L} \cdot \frac{1}{nr} \text{ bits/s.}$$

其中, A 是目标区域的面积, W 是节点的最高传输速率, π 是圆周率, Δ 是大于 0 的常数, L 是源节点到目的节点的平均距离, n 是节点数, r 是理想球状无线电发射模型的发射半径.由此可以看出,通过功率控制减小发射半径和通过睡眠调度减小工作网络的规模,在节省能量的同时,可以在一定程度上提高网络的吞吐能力.

(5) 干扰和竞争:减小通信干扰、减少 MAC 层的竞争和延长网络的生命期基本上是一致的.功率控制可以调节发射范围,睡眠调度可以调节工作节点的数量.这些都能改变 1 跳邻居节点的个数(也就是与它竞争信道的节点数).事实上,对于功率控制,网络无线信道竞争区域的大小与节点的发射半径 r 成正比^[8],所以减小 r 就可以减少竞争.睡眠调度显然也可以通过使尽可能多的节点睡眠来减小干扰和减少竞争.

(6) 网络延迟:当网络负载较高时,低发射功率会带来较小的端到端延迟;而在低负载情况下,低发射功率会带来较大的端到端延迟^[9].对于这一点,一个直观的解释是:当网络负载较低时,高发射功率减少了源节点到目的节点的跳数,所以降低了端到端的延迟;当网络负载较高时,节点对信道的竞争是激烈的,低发射功率由于缓解了竞争而减小了网络延迟.这是功率控制和网络延迟之间的大致关系.

(7) 拓扑性质:事实上,对于网络拓扑的优劣,很难直接根据拓扑控制的终极目标给出定量的度量.因此,在设计拓扑控制(特别是功率控制)方案时,往往退而追求良好的拓扑性质.除了连通性之外,对称性、平面性、稀疏性、节点度的有界性、有限伸展性(spanner property)等,都是希望具有的性质^[10].

此外,拓扑控制还要考虑诸如负载均衡、简单性、可靠性、可扩展性等其他方面.拓扑控制的各种设计目标之间有着错综复杂的关系.对这些关系的研究也是拓扑控制研究的重要内容.

2 拓扑控制的研究现状

当前,拓扑控制的研究主要以最大限度地延长网络的生命期作为设计目标,并集中于功率控制和睡眠调度两个方面.下面分别予以介绍.各种拓扑控制算法的比较见表 1.

Table 1 Comparison of topology control algorithms for wireless sensor networks**表 1** 无线传感器网络拓扑控制算法的比较

Algorithms	Connectivity	Synchronization required	Based on location or direction	Complexity	Node density	Network scale	Heterogeneity
COMPOW	Yes	No	No	Medium	Sparse	Medium	No
CLUSTERPOW	Yes	No	No	High	Sparse	Medium	No
LMA	No	No	No	Low	Sparse	Large	Possible
LMN	No	No	No	Low	Sparse	Large	Possible
CBTC	Yes	No	Yes	Low	Sparse	Large	No
DRNG	Yes	No	Yes	Medium	Sparse	Large	Possible
DLMST	Yes	No	Yes	Medium	Sparse	Large	Possible
XTC	Yes	No	No	Low	Sparse	Large	Possible
RIS	No	Yes	No	Low	Dense	Large	Possible
MSNL	No	No	Yes	Medium	Dense	Large	No
LDAS	No	No	No	Medium	Dense	Large	No
ASCENT	No	No	No	Low	Dense	Large	Possible
PEAS	No	No	No	Low	Dense	Large	Possible
PECAS	No	No	No	Medium	Dense	Large	Possible
CCP	Yes	No	Yes	High	Dense	Large	No
SPAN	Yes	No	No	Medium	Dense	Large	Possible
LEACH	-	Yes	No	Medium	Dense	Small	No
E ECS	-	Yes	No	Medium	Dense	Small	No
LDS	-	No	Yes	Medium	Dense	Small	No
GAF	Yes	No	Yes	Medium	Dense	Large	No
GBR	Yes	No	Yes	High	Dense	Large	No
TopDisc	Yes	No	No	High	Dense	Medium	No
HEED	No	Yes	No	High	Dense	Large	No

2.1 功率控制

功率控制是一个十分复杂的问题.希腊佩特雷大学(University of Patras)的 Kirousis 等人将其简化为发射范围分配问题^[11],简称 RA(range assignment)问题,并详细讨论了该问题的计算复杂性.设 $N=\{u_1, \dots, u_n\}$ 是 $d(d=1,2,3)$ 维空间中代表网络节点位置的点的集合, $r(u_i)$ 代表节点 u_i 的发射半径. RA 问题就是要在保证网络连通的前提下,使网络的发射功率(各节点的发射功率的总和)最小,也就是要最小化 $\sum_{u_i \in N} (r(u_i))^\alpha$, 其中, α 是大于 2 的常数.在一维情况下, RA 问题可以在多项式时间 $O(n^4)$ 内解决;然而在二维^[12]和三维^[11]情况下, RA 问题是 NP 难的.实际的功率控制问题比 RA 问题更为复杂.

这个结论从理论上告诉我们,试图寻找功率控制问题的最优解是不现实的,应该从实际出发,寻找功率控制问题的实用解.针对这一问题,当前已提出了一些解决方案,其基本思想都是通过降低发射功率来延长网络的生命期.下面是几个典型的解决方案,分别代表了目前功率控制的几个典型的研究方向.

(1) 与路由协议结合的功率控制

伊利诺斯大学的 Narayanaswamy 等人提出并实现了一种简单的将功率控制与路由协议相结合的解决方案 COMPOW^[8].其基本思想是:所有的传感器节点使用一致的发射功率,在保证网络连通的前提下,将功率最小化. COMPOW 建立各个功率层上的路由表.在功率 P_i 层上,通过使用功率 P_i 交换 HELLO 消息建立路由表 RT_{P_i} .所有可达节点都是路由表中的表项. COMPOW 选择最小的发射功率 P_{com} ,使得 $RT_{P_{com}}$ 与 $RT_{P_{max}}$ 具有相同数量的表项,其中, P_{max} 是最大发射功率.于是,整个网络都使用公共的发射功率 P_{com} .在节点分布均匀的情况下, COMPOW 具有较好的性能.但是,一个相对孤立的节点会导致所有的节点使用很大的发射功率,所以在节点分布不均的情况下,它的缺陷是明显的. Kawadia 和 Kumar 提出的 CLUSTERPOW^[13]是对 COMPOW 的改进.当转发一个包到目的节点 d 时, CLUSTERPOW 选择出现 d 的最低层次的路由表,设为 $RT_{P_{min}}$,然后,以功率 P_{min} 而不是 P_{com} 将其发送到下一跳节点.在 CLUSTERPOW 中,分簇是隐含的,且不需要任何簇头节点,分簇通过给定功率层的可达性来实现,分簇的层次由功率的层次数来决定,分簇是动态的、分布的. CLUSTERPOW 的主要缺陷是开销太大.

(2) 基于节点度的功率控制

具有代表性的基于节点度算法有柏林工业大学的 Kubisch 等人提出的 LMA 和 LMN^[14]等.基于节点度算法的基本思想是:给定节点度的上限和下限,每个节点动态地调整自己的发射功率,使得节点的度数落在上限和下限之间.但是,基于节点度数的算法一般难以保证网络的连通性.

(3) 基于方向的功率控制

微软亚洲研究院的 Wattenhofer 和康奈尔大学的 Li 等人提出了一种能够保证网络连通性的基于方向的 CBTC 算法^[15].其基本思想是:节点 u 选择最小功率 $p_{u,\rho}$ 使得在任何以 u 为中心的角度为 ρ 的锥形区域内至少有一个邻居.作者证明了当 $\rho \leq 5\pi/6$ 时,可以保证网络的连通性.麻省理工学院的 Bahramgiri 等人又将其推广到三维空间,提出了容错的 CBTC^[16].基于方向的算法需要可靠的方向信息,因而需要很好地解决到达角度问题,节点需要配备多个有向天线,因而对传感器节点提出了较高的要求.

(4) 基于邻近图的功率控制

伊利诺斯大学的 Li 和 Hou 提出的 DRNG 和 DLMST^[17]是两个具有代表性的基于邻近图理论的算法.基于邻近图的功率控制算法的基本思想是:设所有节点都使用最大发射功率发射时形成的拓扑图是 G ,按照一定的邻居判别条件求出该图的邻近图 G' ,每个节点以自己所邻接的最远节点来确定发射功率.经典的邻近图模型有 RNG(relative neighborhood graph),GG(Gabriel graph),DG(Delaunay graph),YG(Yao graph)和 MST(minimum spanning tree)等.DRNG 是基于有向 RNG 的,DLMST 是基于有向局部 MST 的.DRNG 和 DLMST 能够保证网络的连通性,在平均功率和节点度等方面具有较好的性能.基于邻近图的功率控制一般需要精确的位置信息.

此外,微软亚洲研究院的 Wattenhofer 等人提出的 XTC^[18]算法对传感器节点没有太高的要求,对部署环境也没有过强的假设,提供了一个面向简单、实用的研究方向.因为 XTC 代表了功率控制的发展趋势,所以本文将在第 3.1 中详细加以介绍.

2.2 睡眠调度

功率控制通过降低节点的发射功率来延长网络的生存时间,但却没有考虑空闲侦听时的能量消耗和覆盖冗余.事实上,无线通信模块在空闲侦听时的能量消耗与收发状态时相当,覆盖冗余也造成了很大的能量浪费.所以,只有使节点进入睡眠状态,才能大幅度地降低网络的能量消耗.这对于节点密集型和事件驱动型的网络十分有效.如果网络中的节点都具有相同的功能,扮演相同的角色,就称网络是非层次的或平面的,否则就称为是层次型的.层次型网络通常又称为基于簇的网络.下面分别介绍非层次网络和层次型网络的具有代表性的睡眠调度算法.

2.2.1 非层次型网络的睡眠调度算法

非层次型睡眠调度的基本思想是:每个节点根据自己所能获得的信息,独立地控制自己在工作状态和睡眠状态之间的转换.它与层次型睡眠调度的主要区别在于:每个节点都不隶属于某个簇,因而不受簇头节点的控制和影响.

俄亥俄州立大学的 Kumar 等人提出了一种简单的睡眠调度算法 RIS^[19].RIS 将时间划分为周期,在每个周期的开始,每个节点以某一概率独立地决定是否进入睡眠状态.显然,RIS 需要较为严格的时间同步.宾西法尼亚州立大学的 Berman 等人提出了 MSNL^[20],将睡眠调度问题表示成带有覆盖约束的最大化网络生命期问题.MSNL 节点有 3 个状态:活动状态、睡眠状态和过渡状态.当节点处于过渡状态时,如果它发现自己的部分监测区域不能被其他活动状态或过渡状态的节点覆盖,它就立刻转为活动状态,否则进入睡眠状态.MSNL 需要精确的位置信息,并且多个相邻的节点有可能同时进入睡眠状态.维克多利亞大学的 Wu 等人提出了一种不需要位置信息的 LDAS 算法^[6].在没有位置信息的情况下,要确定一个节点的监测区域是否完全被其他节点覆盖是极其困难的,甚至是不可能的.Wu 认为,即使所有的节点都处于活动状态,也很难保证完全覆盖给定的部署区域.基于这种想法,LDAS 基于部分冗余进行调度,它提供对覆盖度的统计保证.但是,LDAS 只适用于节点均匀分布的情况.加州大学洛杉矶分校的 Cerpa 和 Estrin 提出了一种着重于保证数据通路畅通的 ASCENT 算法^[21].如果某个节点发现丢包严重,就向邻居节点发出求救信息;收到求救信息的节点主动成为工作节点,帮助邻居节点转发

数据包.但是,ASCENT 并不能保证网络的连通性,因为它只是通过丢包率来判断连通性的.事实上,当网络不连通时,它是无法检测和修复的.ASCENT 也不能保证能量的均匀消耗.加州大学洛杉矶分校的 Ye 等人提出了一种适用于恶劣环境中高密度传感器网络的 PEAS 算法^[22].PEAS 节点有 3 个状态:睡眠状态、探测状态和工作状态.初始时节点处于睡眠状态,当睡眠定时器溢出时,节点进入探测状态,然后它以某个给定的发射半径广播探测消息,如果收到回答就进入睡眠状态,否则进入工作状态,直到能量耗尽.PEAS 能够保证渐近连通性.加州大学戴维斯分校的 Gui 等人提出的 PECAS^[23]是对 PEAS 的扩展.在 PEAS 中,节点一旦工作就不再睡眠,节点能量耗尽会导致网络被割裂.在 PECAS 中,工作节点工作一段时间后会再次进入睡眠状态,它在对邻居节点的探测消息的回答中发布自己的剩余工作时间,这样,决定进入睡眠状态的工作节点就能够根据邻居节点的剩余工作时间使自己在那个节点睡眠之前苏醒.此外,影响较大的还有华盛顿大学的 Xing 等人提出的 CCP^[24]和麻省理工学院的 Chen 等人提出的 SPAN^[25]等.因为 CCP 和 SPAN 很有代表性,所以本文将在第 3.2 节和第 3.3 节中详细加以介绍.

上面针对非层次网络介绍了一些具有代表性的睡眠调度算法.事实上,这些算法也可以用在层次型网络中,因为它们可以在簇的内部使用.

2.2.2 层次型网络的睡眠调度算法

层次型网络睡眠调度的基本思想是:由簇头节点组成骨干网络,则其他节点就可以(当然未必)进入睡眠状态.层次型网络睡眠调度的关键技术是分簇.

麻省理工学院的 Heinzelman 等人提出了一直被广泛引用的 LEACH 算法^[26].LEACH 需要较为严格的时间同步,也不能保证簇头均匀分布.南京大学的 Ye 等人提出的 EECS 算法^[27]能够保证簇头的均匀分布,但 EECS 与 LEACH 一样,簇头与汇聚节点的单跳通信方式限制了网络的规模.雪城大学(Syracuse University)的 Deng 等人提出了一种适用于基于簇的高密度传感器网络的 LDS 算法^[5].LDS 只考虑簇内的睡眠调度,它假设分簇结构已经存在.但是,LDS 不能保证能量的均匀消耗,因此,Deng 等人又对 LDS 作了一些改进^[28].南加州大学的 Xu 等人提出了以节点地理位置为分簇依据的 GAF 算法^[29].该算法把监测区域划分成正方形虚拟单元格,将节点按照位置信息划入相应的单元格,相邻单元格的任意两个节点可直接通信.GAF 节点有 3 种状态:工作状态、睡眠状态和发现状态.每个单元格只有一个随机产生的簇头节点处于工作状态,其他节点周期性地进入睡眠和发现状态.发现状态的节点可以竞争簇头.GAF 算法需要精确的地理位置,对传感器节点提出了很高的要求.GAF 算法没有考虑到实际网络中节点之间的距离的邻近并不能代表节点之间可以直接通信的问题,也不能保证能量的均匀消耗.渥太华大学的 Zhang 等人提出的 GBR 算法^[30]是对 GAF 算法的改进,其基本思想是在单元格层次上构建连通支配集.GBR 同样需要精确的位置信息.鲁杰斯大学(Rutgers University)的 Deb 等人提出了一种基于图论中最小支配集问题的 TopDisc 算法^[31].理想地,基于分簇的拓扑控制就是要选取最少且足够的链路作为网络的通信骨干,同时减小控制和维护的开销.图论上的最小支配集问题和最小连通支配集问题是对分簇方法的最好描述^[32].对于配置了无限能源的网络,最小支配集消耗的能量是最少的^[33].然而,最小支配集问题是 NP 难问题^[32],最小连通支配集问题是 NP 完全问题^[32],最小 k 跳支配集问题是 NP 完全问题^[34],所以基于最小支配集问题的算法只能寻找近似解.TopDisc 算法能在密集部署的传感器网络中快速地形成分簇结构,并在簇头之间建立树型关系.但这种算法构建的层次型网络灵活性不强,算法的开销太大,也没有考虑到节点的剩余能量.普渡大学的 Younis 和 Fahmy 提出了一种迭代的分簇算法 HEED^[35].因为 HEED 影响较大,所以本文将在第 3.4 节中详细加以介绍.基于分簇的睡眠调度算法还有许许多多,这里不再赘述.

3 代表性算法的详细介绍

下面主要介绍影响较大且有代表性的功率控制算法 XTC^[18]、非层次型睡眠调度算法 CCP^[24]、SPAN^[25]和层次型睡眠调度算法 HEED^[35].

3.1 XTC

XTC 的基本思想是用接收信号的强度作为 RNG 中的距离度量.XTC 算法可分为如下 3 步:

- (1) 邻居排序:节点 u 对其所有的邻居计算一个反映链路质量的全序 \prec_u .在 \prec_u 中,如果节点 w 在节点 v 的前面,则记为 $w \prec_u v$.节点 u 与 \prec_u 中出现越早的节点之间的链路,其质量越好.
- (2) 信息交换:节点 u 向其邻居广播自己的 \prec_u ,同时接收邻居节点建立的 \prec .
- (3) 链路选择:节点 u 按顺序遍历 \prec_u ,先考虑好邻居,后考虑坏邻居.对于 u 的邻居 v ,如果节点 u 没有更好的邻居 w ,使得 $w \prec_v u$,那么 u 就和 v 建立一条通信链路.

XTC 不需要位置信息,对传感器节点没有太高的要求,适用于异构网络,也适用于三维空间.与大多数其他算法相比,XTC 更简单,更实用.但是,XTC 与实用化要求仍然有一定的距离,例如,XTC 并没有考虑到通信链路质量的变化.

3.2 CCP

CCP 的基本思想是:在保证 k -覆盖和 k -连通的前提下,将睡眠节点数最大化.CCP 基于这样一个定理(当然是理想情况下的结论):当发射半径大于或等于感知半径的 2 倍时,如果一个网络 k -覆盖一个凸区域,那么这个网络必然是 k -连通的.这样,CCP 就可以通过保证覆盖度来保证连通度.如果一个节点的监测区域已被其他节点 k -覆盖,那么它就进入睡眠状态,否则进入工作状态.

CCP 节点不必检查它的感知区域内的每一个点是否被其他节点 k -覆盖.Xing 等人通过一个定理给出了一个凸区域 A 被一个节点的集合 k -覆盖的充分条件:(1) 节点与节点之间以及节点与边界之间存在交点;(2) 节点间的所有交点至少是被 k -覆盖的;(3) 节点与边界之间的所有交点至少是被 k -覆盖的.其中,两个节点的交点是指两个节点的感知圆的交点,节点与边界的交点是指节点的感知圆与区域边缘的交点.基于这个定理,Xing 等人给出了通过少数点来判断一个节点的感知区域是否被其他节点 k -覆盖的算法.该算法的时间复杂度为 $O(N^3)$,其中, N 是 2 倍于感知半径内的节点数.

CCP 节点有 3 个基本状态:工作状态、侦听状态和睡眠状态.由于每个节点都是根据局部信息独立地进行调度,所以就有冲突的可能.例如,当一个工作节点死亡时,可能会有多个节点同时接替它的工作.为了避免这种冲突,CCP 引入了加入和退出两个过渡状态.初始时,CCP 节点都处于工作状态.一个处于工作状态的节点如果收到一个 HELLO 消息,它就检查自己是否符合睡眠的条件,如果符合条件,就进入退出状态并启动退出计时器.在退出状态,如果计时器溢出,就广播一个 WITHDRAW 消息,进入睡眠状态,并启动睡眠计时器;如果在计时器溢出之前收到来自邻居节点的 WITHDRAW 或 HELLO 消息,就撤消计时器并返回活动状态.在睡眠状态,如果计时器溢出,就进入侦听状态,并启动侦听计时器.在侦听状态,如果计时器溢出,就返回睡眠状态,同时启动睡眠计时器;如果在计时器溢出之前收到 HELLO,WITHDRAW 或 JOIN 消息,就检查自己是否应该工作,如果是,就进入加入状态,同时启动加入计时器.在加入状态,如果计时器溢出,就进入工作状态并广播 JOIN 消息;在计时器溢出之前,如果收到 JOIN 消息并判断出没有工作的必要,那么该节点就进入睡眠状态.

CCP 能够将网络配置到指定的覆盖度与连通度.这种灵活性使网络能够根据不同的应用和环境进行自配置.但是,CCP 需要较为精确的位置信息,并且当发射半径小于感知半径的 2 倍时,CCP 不能保证网络的连通性.所以,Xing 等人提出将 CCP 与 SPAN 相结合.SPAN 并不能将网络配置到指定的连通度,它只能保持网络原有的连通性.

3.3 SPAN

SPAN 的基本思想是:在不破坏网络原有连通性的前提下,根据节点的剩余能量、邻居的个数、节点的效用等多种因素,自适应地决定是成为骨干节点还是进入睡眠状态.睡眠节点周期性地苏醒,以判断自己是否应该成为骨干节点;骨干节点周期性地判断自己是否应该退出.

骨干节点退出骨干网络的规则是:如果一个骨干节点的任意两个邻居能够直接通信或通过其他工作节点间接地通信,那么它就应该退出(进入睡眠状态).为了保证公平性,一个骨干节点在工作一段时间之后,如果它的

任意两个邻居可以通过其他邻居通信,即使这些邻居不是骨干节点,它也应该退出.为了避免网络的连通性遭到临时性的破坏,节点在宣布退出之后,允许路由协议在新的骨干节点选出之前继续使用原来的骨干节点.

睡眠节点加入骨干网络的规则是:如果一个睡眠节点的任意两个邻居不能直接通信或通过一两个骨干节点间接通信,那么该节点就应该成为骨干节点.为了避免多个节点同时弥补一个空缺的骨干节点,SPAN 采用退避机制,节点在宣布成为骨干节点之前延迟一段时间(退避时间).在延迟之后,如果该节点没有收到其他节点成为骨干节点的消息,它就宣布自己成为骨干节点;如果该节点收到其他节点成为骨干节点的消息,它就重新判断是否满足加入规则,宣布成为骨干节点当且仅当它仍然满足加入规则.为了获得较为合理的退避机制,SPAN 按下面的公式计算退避时间 $delay$:

$$delay = \left(\left(1 - \frac{E_r}{E_m} \right) + (1 - U_i) + R \right) \times N_i \times T, U_i = C_i / \binom{N_i}{2}$$

其中, E_r 是节点的剩余能量, E_m 是该节点的最大能量(电池充满时的能量), U_i 称为节点 i 的效用, R 是区间 $[0,1]$ 上的随机数, N_i 是节点 i 的邻居的个数, T 是一个小包在一个无线链路路上的往返延迟, C_i 是指在节点 i 成为骨干节点时增加的连通的邻居对的个数.可见,SPAN 的退避时间的计算考虑到多种因素.

SPAN 对传感器节点没有特殊的要求,这是它的优点.但是,随着节点密度的增加,SPAN 的节能效果越来越差.这主要是因为 SPAN 采用了 802.11 的节能特性:睡眠节点必须周期性地苏醒并侦听.这种方式的代价是相当大的.

3.4 HEED

HEED 的基本思想是:根据对作为第一因素的剩余能量和作为第二因素的簇内通信代价的综合考虑,周期性地通过迭代的办法实现分簇.HEED 用最小平均可达功率(AMRP)作为当某个节点被选为簇头时的簇内通信代价的度量.AMRP 是指一个簇内所有其他节点与簇头通信所需的最小功率的平均值.Younis 和 Fahmy 认为,根据 AMRP 选择簇头优于根据距离选择簇头,因为它对所有的节点(包括簇头节点)提供统一的分簇机制,而不是像许多其他分簇算法那样在不包括自身的节点的集合中选择最近的簇头节点.

HEED 不依赖于网络的规模,通过 $O(1)$ 次迭代实现分簇.迭代每一步的时间要足够长,使得节点能够收到来自邻居节点的消息.初始时,每个节点要确定在一簇范围内的邻居节点的集合;计算并广播 AMRP;计算自己成为临时簇头的初始概率 CH_p :

$$CH_p = \max \left(C_p \times \frac{E_r}{E_m}, p_{\min} \right),$$

其中, C_p 是设定的簇头节点占总节点数的初始值(例如 5%),事实上,它对最后的分簇结果没有直接的影响; E_r 是估计的剩余能量; E_m 是最大能量; p_{\min} 是设定的最小概率,其作用是保证算法在常数次迭代内完成.

在算法的每一次迭代中,如果节点发现在其邻居中已有临时簇头被选出,就选择代价最小的作为它的临时簇头;如果没有临时簇头被选出,就将 CH_p 乘以 2,并以新的 CH_p 概率推荐自己为临时簇头,如果推荐成功,它就广播自己成为临时簇头的消息.当 CH_p 的值达到 1 时,算法做最后一次迭代,被选举为簇头的节点在最后一次迭代中宣布自己成为簇头.

HEED 综合地考虑了生存时间、可扩展性和负载均衡,对节点的分布和能力也没有特殊的要求.虽然 HEED 的执行并不依赖于同步,但是不同步却会严重影响分簇的质量.

4 存在的问题和需要进一步研究的内容

上文总结了当前无线传感器网络拓扑控制研究中最具代表性的工作,在介绍中也指出了其存在的缺陷.我们进一步将拓扑控制研究中存在的问题(这些问题也是需要进一步研究的内容)主要概括为以下几点:

(1) 模型过于理想化,没有考虑实际应用中的诸多困难

例如,在覆盖控制研究中一般使用二值感知模型.二值感知模型是指传感器节点在平面上的感知范围是一

个以节点为圆心、以感知距离为半径的圆形区域,只有落在该圆形区域内的点才能被该节点覆盖.这与实际情况相差甚远.再如,大多数研究假设节点是同构的,在功率控制研究中,一般认为网络中的所有节点都具有相同的最大发射功率.然而事实上,即使网络中所有的传感器节点使用相同的发射功率,由于天线质量、地形等诸多方面的差异,各个节点所形成的发射范围也是各不相同的,而且研究人员已经发现这种差别很大^[36].所以,异构网络相对于同构网络而言是更现实的网络模型.但是,由于网络的异构性给理论分析带来了困难,人们对异构网络的研究还比较少.再如,许多研究假设传感器节点能够精确定位,但是一方面由于传感器节点的体积、价格、能源等种种限制,另一方面由于传感器网络的部署环境一般比较复杂甚至于十分恶劣,在实际应用中作这样的假设是不太现实的.此外,诸如分布均匀、严格同步等假设都没有考虑到实际应用中的诸多困难.因此,为了研究更加实用的拓扑控制技术,需要建立更加现实的模型,特别是至关重要的网络拓扑模型.研究人员通常使用点图作为网络拓扑的抽象,但实际上,点图并不符合实际情况,而且很难进行定量的分析^[37].我们可以使用随机机的链路来取代确定型的链路^[37],也可以考虑信噪比^[37],只有接收方的信噪比高于某个给定的阈值时,才认为两点之间存在链路.此外,更现实的发射模型、感知模型等其他模型也需要进一步研究.

(2) 对拓扑控制问题缺乏明确的定义和实用的算法

拓扑控制的目标是要形成优化的网络拓扑,那么究竟什么样的拓扑才算是优化的呢?目前对这个问题还没有清晰的理解,这主要是因为对网络性能缺乏有效的度量,这也是功率控制和睡眠调度的研究始终独立进行的重要原因.发射范围分配问题和最小支配集问题分别是理想化的功率控制问题和睡眠调度问题,但是,二者都不能作为某个特定的拓扑控制问题的定义,因为拓扑控制不仅仅是功率控制,也不仅仅是睡眠调度,而且对于具体的功率控制问题和睡眠调度问题,也缺乏实用化的定义.当然,无线传感器网络是与应用相关的,不同的应用系统对拓扑控制的要求也不尽相同,所以不太可能给出一个通用的定义.然而,众多的研究论文在作出种种假设之后,我们看到的仍然是对拓扑控制问题的模糊描述,而且提出的拓扑控制算法也大多是不实用的.因此,这里面有着极其丰富的研究内容.例如,虽然目前大多数的研究以节能作为主要目标,但是,即使在十分理想的情况下,仍然不能判定网络的最小能耗拓扑,即消耗能量最少的骨干网络.现在认为,最小支配集消耗的能量最少,然而,这种最优是在没有考虑通信代价的前提下得出的,它既没有考虑簇内通信的能量消耗,也没有考虑簇间通信的能量消耗.虽然在实际应用中不太可能构造最优的网络拓扑,但是对最优网络拓扑的研究对于拓扑控制算法的设计具有重大的指导意义.我们需要在最小能耗意义、最小干扰意义、负载均衡意义以及在综合网络性能等其他意义下定义并分析或解决拓扑控制问题.

(3) 对网络性能缺乏有效的度量

拓扑控制要提高各种网络性能,包括覆盖质量、连通质量、能量消耗、通信干扰、网络延迟、可靠性、可扩展性等.然而对这些网络性能却缺乏有效的度量.例如,对覆盖质量的分析,在没有精确位置信息的情况下,分析网络对目标区域的覆盖质量是极其困难的.再如网络的生命期,虽然人们提出了多种网络生命期的定义,但都不能真正反映网络的生存时间.事实上,网络的生命期是一个综合的性能指标,而实用的拓扑控制技术就需要考虑这样的综合性能.然而,这些性能之间存在着错综复杂的关系,人们对这些关系的认识还十分模糊.例如,一般认为降低能耗和减小干扰是一致的,然而有研究表明,它们有时也是矛盾的^[38].再如,CCP 中所使用的覆盖与连通的关系对于凸区域覆盖来说是正确的,但是对于目标点覆盖却未必正确^[4].而且有些网络性能,如网络拓扑的稀疏性和容错性,在很大程度上是矛盾的.这些都增加了综合考虑网络性能的困难.因此,对网络性能的度量问题,特别是综合网络性能的度量问题以及网络性能之间的关系与权衡问题,都是拓扑控制研究的重要内容.

(4) 拓扑控制在协议栈中的位置尚难明确

这是因为拓扑控制与许多其他方面有着密切的关系.拓扑控制直接影响物理层、链路层、网络层和传输层^[39].它使传感器网络的协议栈(称为“协议栈”是习惯的说法,事实上,无线传感器网络的协议栈已不再是严格意义上的栈结构)的层与层之间的界限不如有线网络的协议栈那样清晰.于是就产生这样一个问题,拓扑控制到底应该放在哪里?虽然已有许多关于拓扑控制与其他方面相结合的研究,但是目前对这个问题的回答还没有定论.拓扑控制可以放在 MAC 层,可以放在网络层,也可以放在 MAC 层之上、网络层之下,甚至不能否认,拓扑控

制不可以分散在各层^[40].这给协议栈的设计带来了困难.因此,拓扑控制与介质访问、路由、数据融合、数据存储等其他方面相结合的研究极大地拓宽了拓扑控制的研究领域.

(5) 研究结果没有足够的说服力

大多数的研究对拓扑控制算法只作理论上的分析和小规模模拟.但是理论分析所基于的模型本身就是理想化的.小规模模拟又不能仿真大规模的网络及其复杂的部署环境.实验和应用是算法有效性的最有说服力的证明.但是由于实验成本太高,不太可能做大量节点的实验.同样由于成本和技术等方面的原因,无线传感器网络还没有进入实用阶段.这使得目前的研究结果普遍缺乏足够的说服力.尤其是最近,我们与香港科技大学和香港理工大学合作研究表明,在较为真实的环境下,对LEACH,HEED等算法的大规模仿真结果与现有文献的结论相差甚远.为了增强研究结果的说服力,我们需要更加现实的模型.这一方面降低了对传感器节点和部署环境的要求,另一方面也增强了建立在模型基础上的理论分析的说服力.此外,对拓扑控制技术验证平台的研究也是十分必要的.

由此看来,拓扑控制还存在许多问题,这些问题构成了拓扑控制研究的丰富内容.这些研究内容之间有着极为密切的关系,它们是相互制约、相互促进、不可分割的整体.

5 总 结

本文综述了无线传感器网络拓扑控制的研究现状,并分析了当前研究中存在的问题.从目前的研究现状来看,拓扑控制研究已经形成了功率控制和睡眠调度两个主流方向.在功率控制方面,已经提出了 CLUSTERPOW等与路由协议结合的算法、LMA等基于节点度数的算法、CBTC等基于方向的算法、DRNG等基于邻近图的算法以及XTC等追求简单实用的算法.在睡眠调度方面,已经提出了CCP,SPAN,RIS等非层次型睡眠调度算法和HEED,GAF,TopDisc等层次型睡眠调度算法.但是,目前的研究还普遍存在着模型过于理想化、对网络性能的综合考虑较少、研究结果没有足够的说服力等问题.总之,拓扑控制已经取得了初步的研究成果,但是大多数的拓扑控制算法还只停留在理论研究阶段,没有考虑实际应用的诸多困难.拓扑控制还有许多问题需要进一步研究,特别是需要探索更加实用的拓扑控制技术.以实际应用为背景、多种机制相结合、综合考虑网络性能将是拓扑控制研究的发展趋势.

References:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002,40(8): 102-114.
- [2] Poduri S, Patten S, Krishnamachari B, Sukhatme G. A unifying framework for tunable topology control in sensor networks. Technical Report, CRES-05-004, University of Southern California, 2005. 1-15.
- [3] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, Srivastava MB. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks. In: Bauer F, Cavendish D, eds. *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*. New York: IEEE Press, 2001. 1380-1387.
- [4] Thai MT, Wang F, Du DZ. Coverage problems in wireless sensor networks: designs and analysis. *Int'l Journal of Sensor Networks (Special Issue on Coverage Problems in Sensor Networks)*, 2007. <http://www-users.cs.umn.edu/~mythai/research.html>
- [5] Deng J, Han YS, Heinzelman WB, Varshney PK. Scheduling sleeping nodes in high density cluster-based sensor networks. *ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications (MONET)*, 2005,10(6):825-835.
- [6] Wu K, Gao Y, Li F, Xiao Y. Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks. *ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications (MONET)*, 2005,10(6):837-852.
- [7] Gupta P, Kumar PR. The capacity of wireless networks. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2000,46(2):388-404.
- [8] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas RS, Kumar PR. Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol. In: *Proc. of the European Wireless Conf. Florence, 2002*. 156-162.
- [9] Kawadia V. Protocols and architecture for wireless ad hoc networks [Ph.D. Thesis]. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2004.

- [10] Zhang X, Lu SL, Chen DX, Xie L. PREG: A practical power control algorithm based on a novel proximity graph for heterogeneous wireless sensor networks. In: Cheng XZ, Li W, Znati T, eds. Proc. of the 1st Int'l Conf. on Wireless Algorithms, Systems and Applications (WASA). LNCS 4138, Berlin: Springer-Verlag, 2006. 620–631.
- [11] Kirousis LM, Kranakis E, Krizanc D, Pelc A. Power consumption in packet radio networks. *Theoretical Computer Science*, 2000, 243(1-2):289–305.
- [12] Clementi A, Penna P, Silvestri R. On the power assignment problem in radio networks. *ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications (MONET)*, 2004,9(2):125–140.
- [13] Kawadia V, Kumar PR. Power control and clustering in ad-hoc networks. In: Mitchell K, ed. Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM). New York: IEEE Press, 2003. 459–469.
- [14] Kubisch M, Karl H, Wolisz A, Zhong LC, Rabaey J. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks. In: Yanikomeroglu H, ed. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). New York: IEEE Press, 2003. 16–20.
- [15] Li L, Halpern JY, Bahl P, Wang YM, Wattenhofer R. A cone-based distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2005,13(1):147–159.
- [16] Bahramgiri M, Hajiaghayi MT, Mirrokni VS. Fault-Tolerant and 3-dimensional distributed topology control algorithms in wireless multihop networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN). 2002. 392–397.
- [17] Li N, Hou JC. Topology control in heterogeneous wireless networks: Problems and solutions. In: Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM). New York: IEEE Press, 2004. 232–243.
- [18] Wattenhofer R, Zollinger A. XTC: A practical topology control algorithm for ad-hoc networks. In: Panda DK, Duato J, Stunkel C, eds. Proc. of the Int'l Parallel and Distributed Processing Symp. (IPDPS). New Mexico: IEEE Press, 2004. 216–223.
- [19] Kumar S, Lai TH, Balogh J. On k -coverage in a mostly sleeping sensor network. In: Haas ZJ, ed. Proc. of the ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom). New York: ACM Press, 2004. 144–158.
- [20] Berman P, Calinescu G, Shah C, Zelikovsky A. Efficient energy management in sensor networks. In: Xiao Y, Pan Y, eds. Proc. of the Ad Hoc and Sensor Networks, Series on Wireless Networks and Mobile Computing. New York: Nova Science Publishers, 2005.
- [21] Cerpa A, Estrin D. ASCENT: Adaptive self-configuring sensor networks topologies. In: Stojmenovic I, Olariu S, eds. Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM). New York: IEEE Press, 2002. 1278–1287.
- [22] Ye F, Zhong G, Lu S, Zhang L. PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks. In: Stankovic J, Zhao W, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS). Providence: IEEE Press, 2003. 28–37.
- [23] Gui C, Mohapatra P. Power conservation and quality of surveillance in target tracking sensor networks. In: Haas ZJ, ed. Proc. of the ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom). New York: ACM Press, 2004. 129–143.
- [24] Xing GL, Wang XR, Zhang YF, Lu CY, Pless R, Gill C. Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks. *ACM Trans. on Sensor Networks*, 2005,1(1):36–72.
- [25] Chen B, Jamieson K, Balakrishnan H, Morris R. SPAN: An energy efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. *ACM Wireless Networks*, 2002,8(5):481–494.
- [26] Heinzelman WR, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Nunamaker J, Sprague R, eds. Proc. of the Hawaiian Int'l Conf. on System Science (HICSS). Washington: IEEE Press, 2000. 3005–3014.
- [27] Ye M, Li CF, Chen GH, Wu J. EECS: An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks. In: Dahlberg T, Oliver R, Sen A, Xue GL, eds. Proc. of the IEEE Int'l Workshop on Strategies for Energy Efficiency in Ad Hoc and Sensor Networks. New York: IEEE Press, 2005. 535–540.
- [28] Deng J, Han YS, Heinzelman WB, Varshney PK. Balanced-Energy sleep scheduling scheme for high density cluster-based sensor networks. *Elsevier Computer Communications Journal (Special Issue on ASWN 2004)*, 2005,28(14):1631–1642.
- [29] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-Informed energy conservation for ad hoc routing. In: Rose C, ed. Proc. of the ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom). New York: ACM Press, 2001. 70–84.
- [30] Zhang B, Moutfah H. Efficient grid-based routing in wireless multi-hop networks. In: Proc. of the IEEE Symp. on Computers and Communications (ISCC). Cartagena: IEEE Press, 2005. 367–372.

- [31] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management. Technical Report, DCS-TR-441, Rutgers University, 2001.
- [32] Bao LC, Garcia-Luna-Aceves JJ. Topology management in ad hoc networks. In: Gerla M, ed. Proc. of the ACM Int'l Symp. on Mobile Ad-Hoc Networking and Computing (MobiHoc). New York: ACM Press, 2003. 129–140.
- [33] He GH, Zheng R, Gupta I, Sha L. A framework for time indexing in sensor networks. ACM Trans. on Sensor Networks, 2005,1(1): 101–133.
- [34] Amis AD, Prakash R, Huynh D, Vuong T. Max-Min d -cluster formation in wireless ad hoc networks. In: Bauer F, Irene K, eds. Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM). Tel Aviv: IEEE Press, 2000. 32–41.
- [35] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004,3(4):660–669.
- [36] Li XY, Song WZ, Wang Y. Localized topology control for heterogeneous wireless sensor networks. ACM Trans. on Sensor Networks, 2005,2(1):129–153.
- [37] Santi P. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. ACM Computing Surveys, 2005,37(2):164–194.
- [38] Burkhart M, Rickenbach PV, Wattenhofer R, Zollinger A. Does topology control reduce interference? In: Murai J, Perkins CE, Tassiulas L, eds. Proc. of the ACM Int'l Symp. on Mobile Ad-Hoc Networking and Computing (MobiHoc). 2004. 9–19.
- [39] Bisnik N. Protocol design for wireless ad hoc networks: The cross-layer paradigm. Technical Report, Rennselaer Polytechnic Institute, 2005.
- [40] Kawadia V, Kumar PR. A cautionary perspective on cross-layer design. IEEE Wireless Communications, 2005,12(1):3–11.



张学(1975 -),男,辽宁绥中人,博士生,讲师,主要研究领域为分布并行计算,无线传感器网络.



陈道蔷(1947 -),男,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为分布并行计算.



陆桑璐(1970 -),女,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为分布并行计算,传感器网络,普适计算.



谢立(1942 -),男,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为分布并行计算.



陈贵海(1963 -),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为并行计算,网络计算.